

M. Ganz, S. Hackmayer, quattro GmbH
C. Kruse, A. Reck, Emitec GmbH

Innovatives Katalysatorsystem für den Audi RS6, 8 Zyl, 4,2 ltr, 331 kW mit LEV Zertifizierung

Advanced Catalyst System for the Audi RS6, 8 Zyl, 4,2 ltr, 331 hp with LEV Certification

Zusammenfassung

Seit 2002 ist der sportliche Audi RS6, TLEV mit seinem 8 Zylinder Biturbomotor in Serie. Der Hochleistungsmotor mit 4,2 ltr. Hubraum besitzt ein überragendes Drehmoment von 560 Nm und leistet 331 kW.

Um der anhaltenden Nachfrage in den USA gerecht zu werden, musste für den Verkauf ab 2004 die LEV-Gesetzgebung erfüllt werden. Die daher erforderliche Halbierung der Emissionen erforderte sowohl motorische Maßnahmen, als auch ein innovatives Katalysatorsystem, wobei der Abgasgedruck und der zur Verfügung stehende Bauraum nicht verändert werden durfte.

Zur Abgasnachbehandlung werden zwei motornah- und zwei Unterbodenkatalysatoren mit Metallträgerstruktur verwendet.

Im Audi RS6, LEV wird weltweit erstmals ein völlig neues Katalysatorkonzept, das „PE-Design“, in Serie eingesetzt.

Die für den Vorkatalysator verwendeten Metallfolien sind mit 8 mm großen Löchern perforiert [1]. Durch die sogenannte PE-Folie ist es erstmalig möglich, die Strömung von einem Zellkanal in die Nachbarkanäle überströmen zu lassen.

Durch die Perforation und Verwendung einer dünneren Folie konnte bei gleicher Zelldichte die Wärmekapazität des Metallträgers gegenüber der TLEV-Variante um die Hälfte reduziert werden. Dies hat zur Folge, dass der Katalysator im Kaltstart schneller die Betriebstemperatur erreicht.

Unterstützt werden die Kaltstarteigenschaften durch die Gestaltung des Katalysatormantels mit integrierter Luftspaltisolation, bei der die Wärmeverluste insbesondere im für den Kaltstart wichtigen vorderen Bereich minimiert werden.

In Verbindung mit den motorischen Maßnahmen sowie der parallel entwickelten Beschichtung von Engelhard Technologies konnten die LEV-Grenzwerte auch nach 60.000 Meilen Straßendauerlauf deutlich unterschritten werden.

Abstract

The sporty Audi RS6, TLEV with a V8 bi-turbo engine has been in production since 2002. The 4.2-litre, 450 hp high performance engine produces outstanding torque of 560 Nm.

In order to respond to continuing demand in the US, 2004 sales had to comply with LEV legislation. The resulting 50 % reduction in emissions required both engine modifications and an innovative catalytic converter system without changes to the exhaust back pressure and the available space.

The car is fitted with two close-coupled and two underfloor catalytic converters with a metal substrate structure.

The Audi RS6, LEV is world wide the first mass produced vehicle to use a completely new catalytic converter system, the "PE design".

The metal foils used in the pre-catalytic converter have 8-mm perforations [1]. The so-called PE foils permit the crossflow of the exhaust gases from one cell channel into adjacent channels. Because of the perforations and a thinner foil the heat capacity of the metal substrate could be reduced by half compared to the TLEV version. As a result the catalytic converter reaches its operating temperature faster from a cold start.

The cold start properties are supported by the design of a converter mantle with integrated air gap insulation, which minimises heat loss particularly in the front section important during cold starts.

In combination with the engine modifications and the coating developed by Engelhard Technologies at the same time it was possible to keep emission levels well below the LEV limits even after a 60,000-mile endurance test under realistic driving conditions.

1. Einführung und Aufgabenstellung

1.1 Einführung

Durch Entwicklung und Produktion des AUDI *RS4* (V6 2,7 ltr. Biturbo mit 280 KW) in den Jahren 1999 und 2000 wurde innerhalb der AUDI AG und der quattro GmbH der Grundstein für ein weiteres Produktsegment gelegt, welches bezüglich Fahrleistungen und Fahrspaß das High-End in der Skala der alltagstauglichen Serienfahrzeuge darstellt.

Der Erfolg des *RS4* mit weit über 6.000 verkauften Einheiten war Ausgangspunkt für die Entwicklung des *RS6* (V8 Biturbo, 4,2 ltr.), welcher seit Mitte 2002 erfolgreich auf dem Markt ist.

Während der *RS4* eher den jüngeren, sportlichen Fahrer ansprechen sollte, wurde beim *RS6* die Kundenzielgruppe erweitert: Der *RS6* wurde für die Gruppe der sportlich ambitionierten, jedoch auch komfortbewussten Fahrer konstruiert, welche überlegene Fahrleistungen mit hoher Alltagstauglichkeit wünschen.



Abb. 1: Audi RS4 und RS6 der quattro GmbH

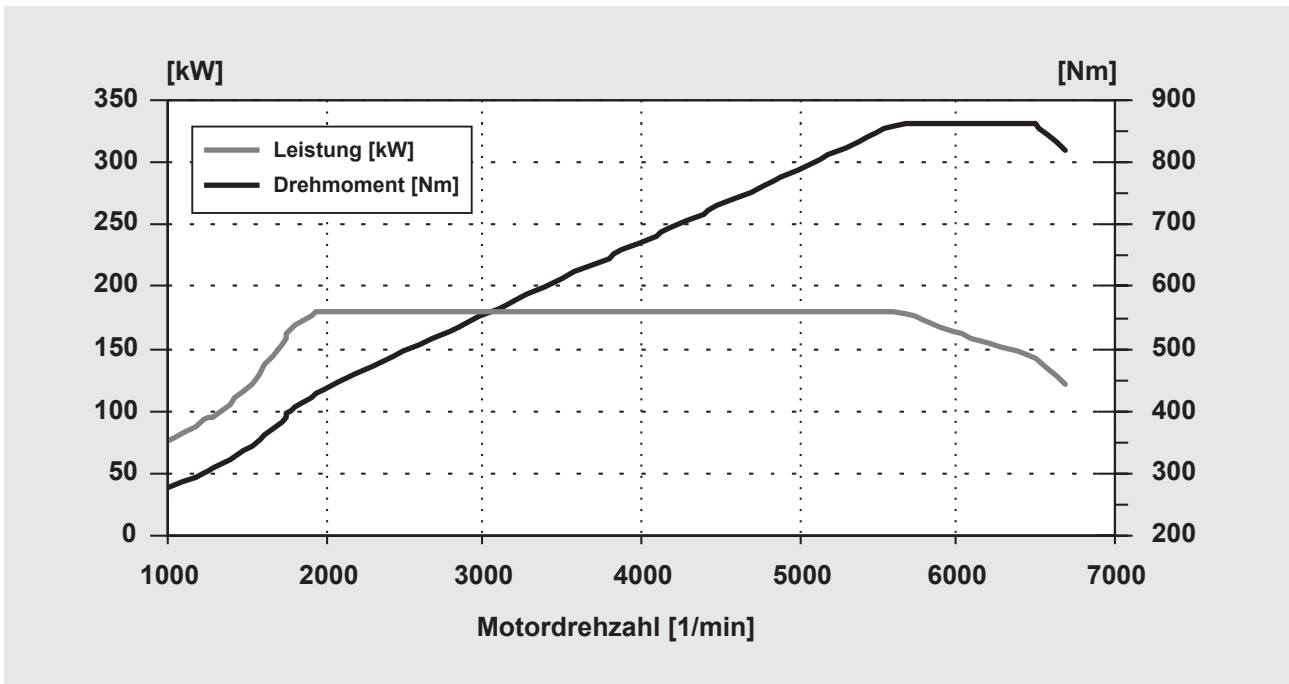


Abb. 2: Leistungs- und Drehmomentverlauf

Die Erwartungen dieser Kundengruppe erfüllt der RS6 u. a. durch sein V8 Biturbetriebwerk mit einer Maximalleistung von 331 kW. Das Drehmoment von 560 Nm, welches bereits ab einer Drehzahl von 1950 U/min über ein weit nutzbares Drehzahlband bis zur Nennleistung vorliegt, garantiert Alltags-tauglichkeit und Fahrspaß [2].

Diese Auslegung ermöglicht sportwagenähnliche Fahrleistungen, wie die folgende Tabelle zeigt.

Anfahrbeschleunigung	0 - 100 km/h	4,7 s
Anfahrbeschleunigung	0 - 200 km/h	17,6 s
Überholbeschleunigung	80 - 120 km/h	3,1 s
Überholbeschleunigung	120 - 180 km/h	6,7 s

Abb. 3: Beschleunigungs- und Elastizitätswerte

Nach Einführung in Europa, bildete sich auch in den USA eine erfreulich hohe Nachfrage nach dem RS6. Die vorhandene für Europa entwickelte Abgasreinigungstechnologie ermöglichte eine schnelle und kostengünstige Entwicklung auf die bis Ende 2003 gültige TLEV-Gesetzgebung.

Die den zwei Abgasturboladern nachgeschalteten Vorkatalysatoren haben einen Durchmesser von 85 mm und eine Länge von 74,5 mm. Die Zelldichte beträgt 400 Zellen pro Quadratinch (cpsi).

Die beiden elliptischen Unterbodenkatalysatoren in den Abmessungen 139 x 82 x 150 mm besitzen eine Zelldichte von 200 cpsi.

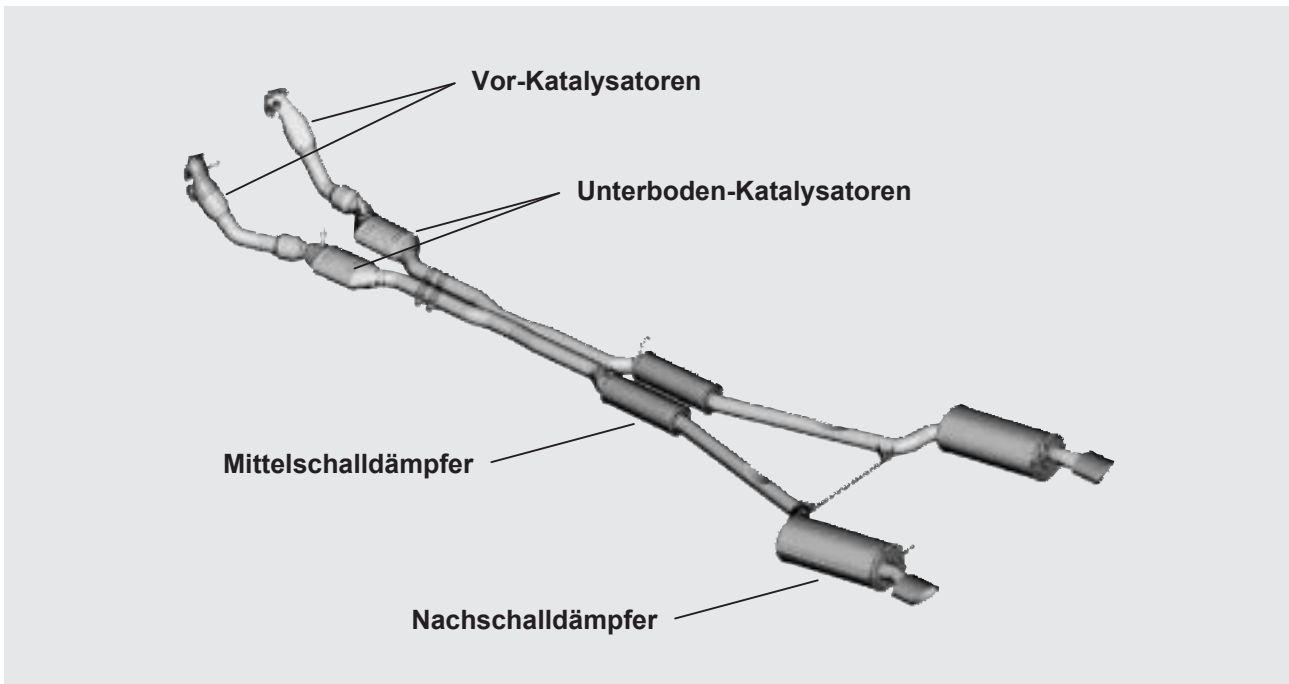


Abb. 4: Druckverlustoptimierte Metallträgerkatalysator- und Schalldämpferanlage

1.2 Aufgabenstellung

Die anhaltend hohe Nachfrage in den USA machte eine deutliche Absenkung der Emissionswerte notwendig, um die ab 2004 gültige LEV-Abgasnorm zu erfüllen.

	HC [g/Meile]	CO [g/Meile]	NO _x [g/Meile]
TLEV	0,125	3,4	0,4
LEV	0,075	3,4	0,2

Abb. 5: Grenzwerte für TLEV und LEV

Die Reduzierung der Emissionen von TLEV auf LEV erfordert 40 % Verminderung der Kohlenwasserstoff- (HC) und eine Halbierung der Stickoxidemission (NO_x).

Dazu sind aus Kosten- und Termingründen als auch aus Sicht der Fertigung folgende Randbedingungen einzuhalten:

- Kein Leistungsverlust für die LEV-Variante
- Aufrechterhaltung des Motorpackaging (gleiches Canning)
- Keine Änderung der Fertigungs- und Montageabläufe

Da im betriebswarmen Zustand die Umsatzrate schon bei der TLEV-Variante 99,7 % beträgt, ist für das Erreichen der LEV-Grenzwerte die Anspringszeit der Vorkatalysatoren (Light Off) entscheidend. Der weitaus größte Anteil an Schadstoffen wird unmittelbar nach dem Motorstart emittiert, da die Katalysatoren noch nicht aktiv sind. Damit die Katalysatoren sich schnell aufheizen ist ein Träger mit möglichst geringer thermischer Masse (Wärmekapazität) und gutem Wärmeübergang erforderlich.

Bei Turbomotoren ist das schnelle Erreichen der Light Off Zeit noch problematischer, da die Abgasturbolader die für den Katalysator notwendige Wärme entziehen.

Um die Zeit zwischen Motorstart und Light Off zu verkürzen, können sowohl motorische Maßnahmen zur Temperaturerhöhung als auch Änderungen am Katalysator zum Ziel führen.

Verbesserung der Effektivität durch Maßnahmen am Katalysator:

- motornahe Anordnung der Vorkatalysatoren
- Reduzierung der Wärmekapazität durch dünnere Folien oder kleineren Querschnitt
- Erhöhung der Zelldichte
- Strömungsoptimierung, Querströmung, Lambdaqualität

Verbesserung des Light Off durch Maßnahmen an der Motorsteuerung:

- Anpassung der Sekundärluft
- Zündwinkel auf Spätzündung
- Anhebung der Drehzahl

2. Lösungsansätze von TLEV zu LEV

2.1 Maßnahmen am Katalysator

Die Analyse der kumulierten Emissionen über den Gesamttest ergab, dass die Effektivität im betriebswarmen Zustand ausreichend ist und das größte Potential in der Verbesserung der Kaltstarts liegt. Daher wurden die Unterbodenkatalysatoren beibehalten und die Vorkatalysatoren optimiert.

Eine Optimierung des Kaltstartverhaltens der Vorkatalysatoren kann durch die folgenden Parameter ermöglicht werden:

- a) Reduzierung der Wärmekapazität [3]
 - Reduzierung der Wandstärke
 - Strukturierung der Folien (Perforation)
- b) Verkleinerung des Katalysatorquerschnitts [4]
- c) Erhöhung der Zelldichte bei gleichzeitiger Reduzierung der Wandstärke [4]
- d) Verringerung von Wärmeverlusten [5]

Aufgrund der Entwicklungsvorgabe hinsichtlich Bauraum und Druckverlust scheiden die Möglichkeiten b) und c) aus.

Um die Vorkatalysatoren unter betriebswarmen Bedingungen zu verbessern, sind die folgenden Schritte zielführend:

- a) Erhöhung des Stofftransportes [6]
 - Erhöhung der Zelldichte
 - Strukturierung der Folien
- b) Vergrößerung des Volumens (Länge erhöhen) [7]
- c) Verringerung von Wärmeverlusten (Isolation)
- d) Verbesserung der Strömungsverteilung

Auch hier ist aus den genannten Gründen eine Erhöhung der Zelldichte, sowie die Erhöhung des Katalysatorvolumens nicht einsetzbar.

Neben der Reduzierung der Wärmekapazität gilt es, die Wärmeverluste zu minimieren und die Durchströmung des Katalysators zu verbessern. Dies wurde durch das im Folgenden beschriebene PE-Design ermöglicht.

2.1.1 PE-Design

Bei der PE-Struktur werden die glatten und gewellten Folien für den Metallträger mit Löchern von 8 mm Durchmesser versehen.

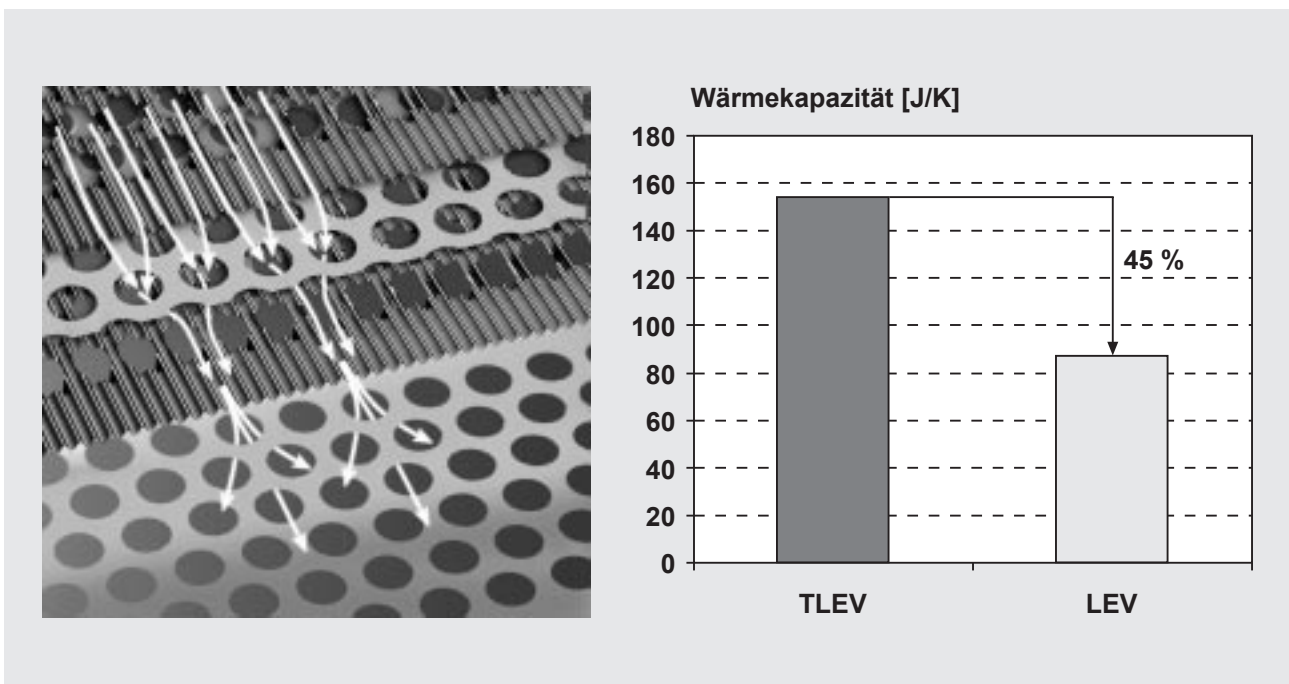


Abb. 6: PE-Design

2.1.1.1 Wärmekapazität

Der Flächenanteil der Löcher und damit des entfernten Folienmaterials beträgt 31 %. Zusätzlich wurde die Folienstärke von 50 μm auf 40 μm reduziert.

Gegenüber der TLEV-Variante konnte so die Wärmekapazität des Trägermaterial um nahezu die Hälfte reduziert werden.

2.1.1.2 Strömungsverteilung und Druckverlust

Durch die Perforation wird die Kanalwand unterbrochen, sodass das Abgas im Gegensatz zu üblichen Katalysatorträgern in die Nachbarkanäle strömen kann.

Bei benachbarten Kanälen mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten kann durch die Löcher ein Geschwindigkeitsausgleich erzielt werden.

Für motornahe Katalysatoren mit einer ungleichförmigen Anströmung wird über den Katalysatorquerschnitt die Strömung harmonisiert. Der Uniformity Index, UI [8] gibt einen Anhaltspunkt über die



Abb. 7: Radialer Strömungsausgleich durch PE-Design

Gleichverteilung der Strömung in einem Katalysator. Bild 8 zeigt die Strömungsverteilung gemessen mit einem Hitzdrahtanemometer hinter dem Vorkatalysator bei einer Re-Zahl von 60.000. Das Wastegate des Turboladers wurde dabei geöffnet.

Eine Erhöhung des Uniformity Index hat eine gleichmäßigere Nutzung des Katalysatorvolumens und damit eine verzögerte Alterung des Trägers zur Folge.

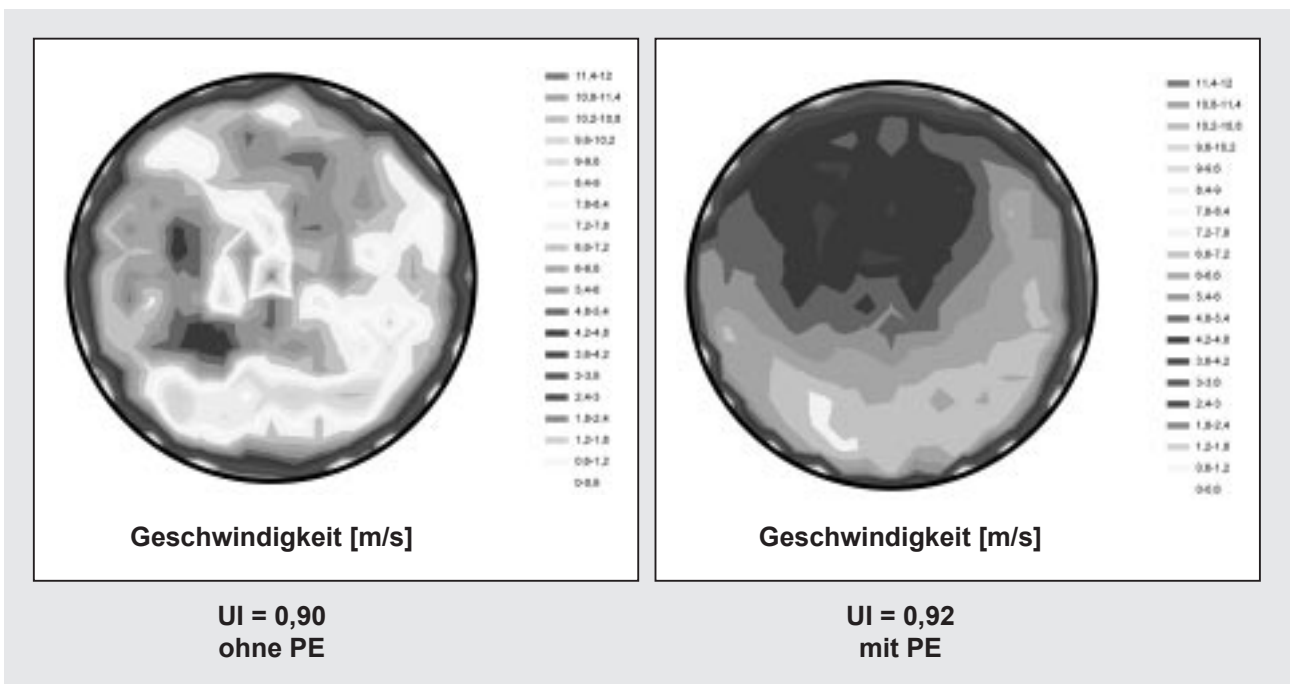


Abb. 8: Strömungsverteilung

Die Vergleichmäßigung der Katalysatoranströmung sowie, die Lochstruktur bewirken außerdem eine Verminderung des Druckverlustes.

Druckverlustmessungen bei Standard- und PE-Katalysator zeigten einen um ca. 15 % geringeren Gegendruck beim PE-Design.

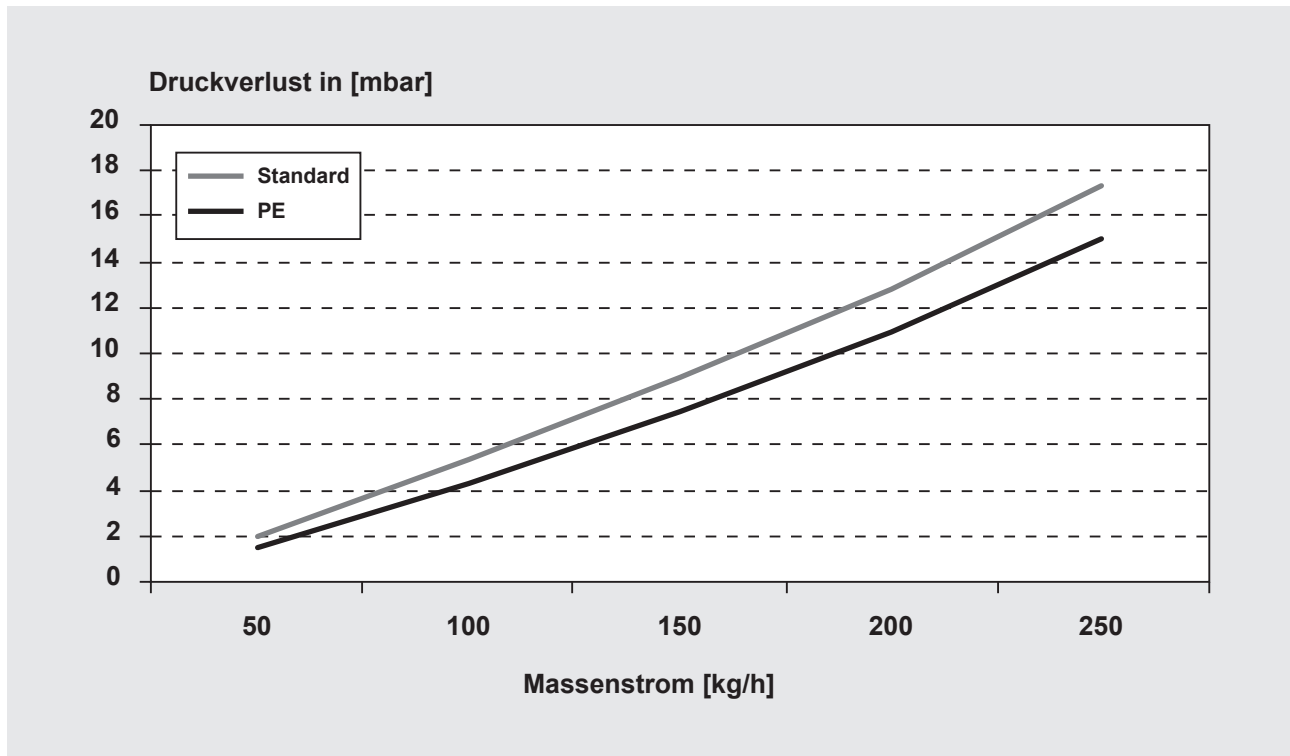


Abb. 9: Druckverlustvergleich Standard- und PE-Katalysator

2.1.1.3 Stofftransport (betriebswarm)

Unter betriebswarmen Bedingungen wird die Katalyse durch den Stofftransport limitiert.

Beim Standard Träger nimmt das Abgas kurz nach Eintritt in den Katalysatorkanal eine laminare Strömungsform an. Schadstoffe, die in der Kanalmitte fließen, gelangen nur durch Diffusionsvorgänge an die aktiven Zentren der beschichteten Wände. Die Folge ist ein begrenzter Stoffübergang.

Beim PE-Träger wird, wie oben beschrieben, regelmäßig die Zellkanalwand unterbrochen. Das Abgas mischt sich mit dem Gas aus den Nachbarkanälen, bevor es mit einer neuen Anlaufströmung wieder in den Zellkanal eintritt, was in der Wirkungsweise mit einer Turbulenz ähnlichen Einlaufströmung vergleichbar ist und den Stofftransport intensiviert.

2.1.1.4 Anforderung an die Beschichtung

Die Beschichtung eines PE-Katalysators stellt besondere Anforderungen an die Beschichtungstechnologie. Die Schichtdicke des Wash-Coats darf nicht höher sein als bei standardmäßig zu beschichtenden Trägern. Um Auswirkungen auf den Abgasgegendruck zu vermeiden, muss die aufgetragene Wash-Coat Menge im Verhältnis zur Fläche konstant bleiben.

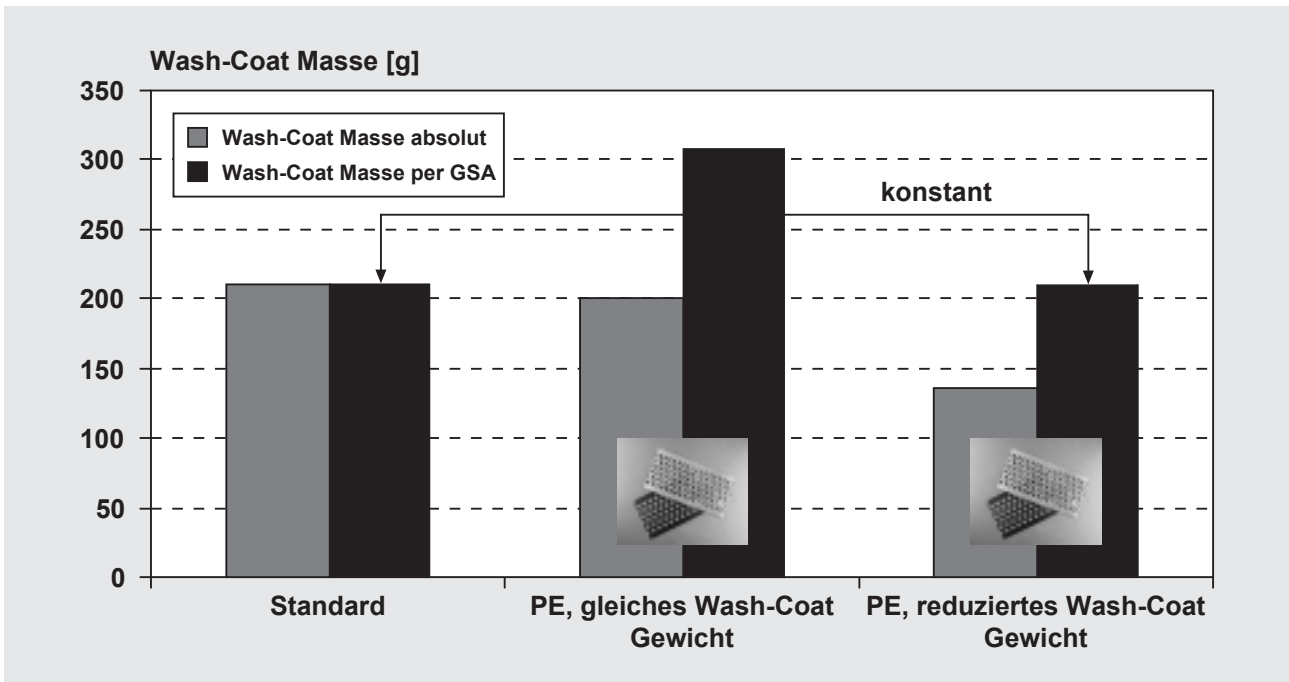


Abb. 10: PE-Design angepasste Wash-Coat Masse

Dennoch sollte die Sauerstoffspeicherfähigkeit des Katalysators erhalten bleiben. Bei geringerer Wash-Coat Menge muss also eine spezifisch höhere Sauerstoffspeicherfähigkeit sichergestellt werden. Wärmekapazität und Schichtdicke des Wash-Coats haben Einfluss auf das Anspringverhalten.

Die verwendete Technologie wurde von Engelhard für perforierte/strukturierte Metallträger neu entwickelt. Darüber hinaus wurde das Beschichtungsverfahren optimiert, um auch auf den strukturierten Folien einen gleichmäßig dünnen Wash-Coat aufzubringen [9].

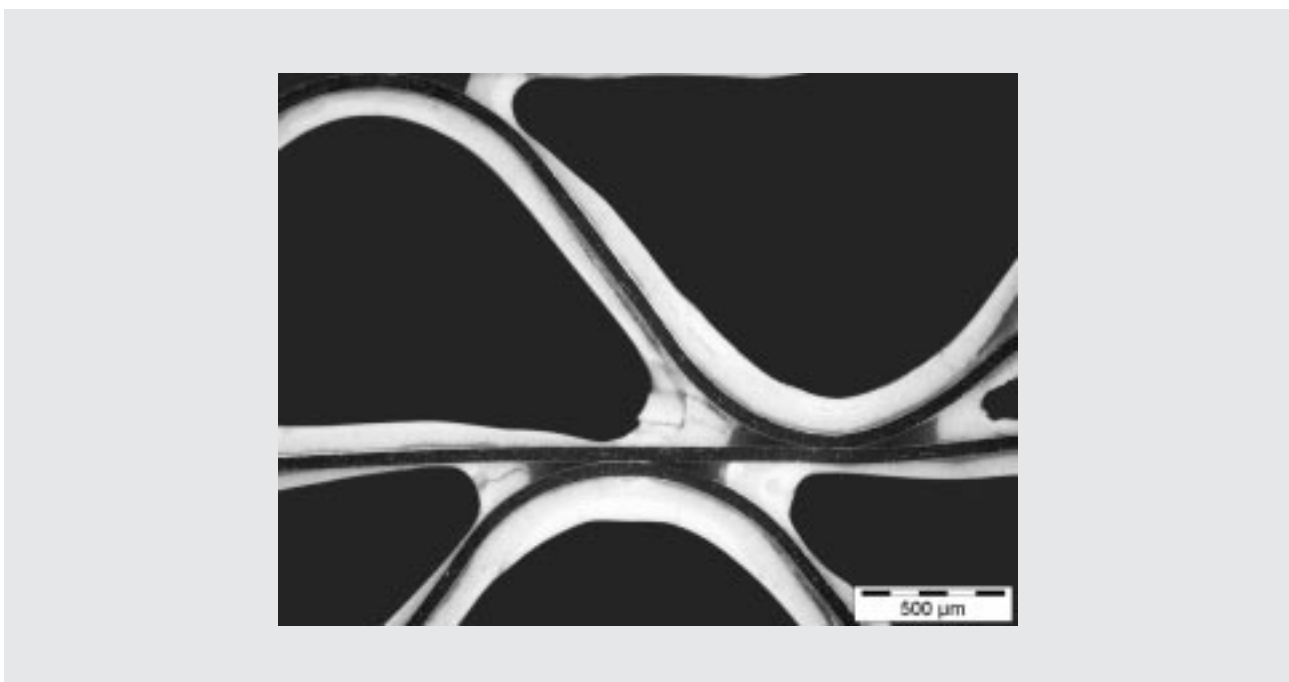


Abb. 11: Wash-Coat Verteilung

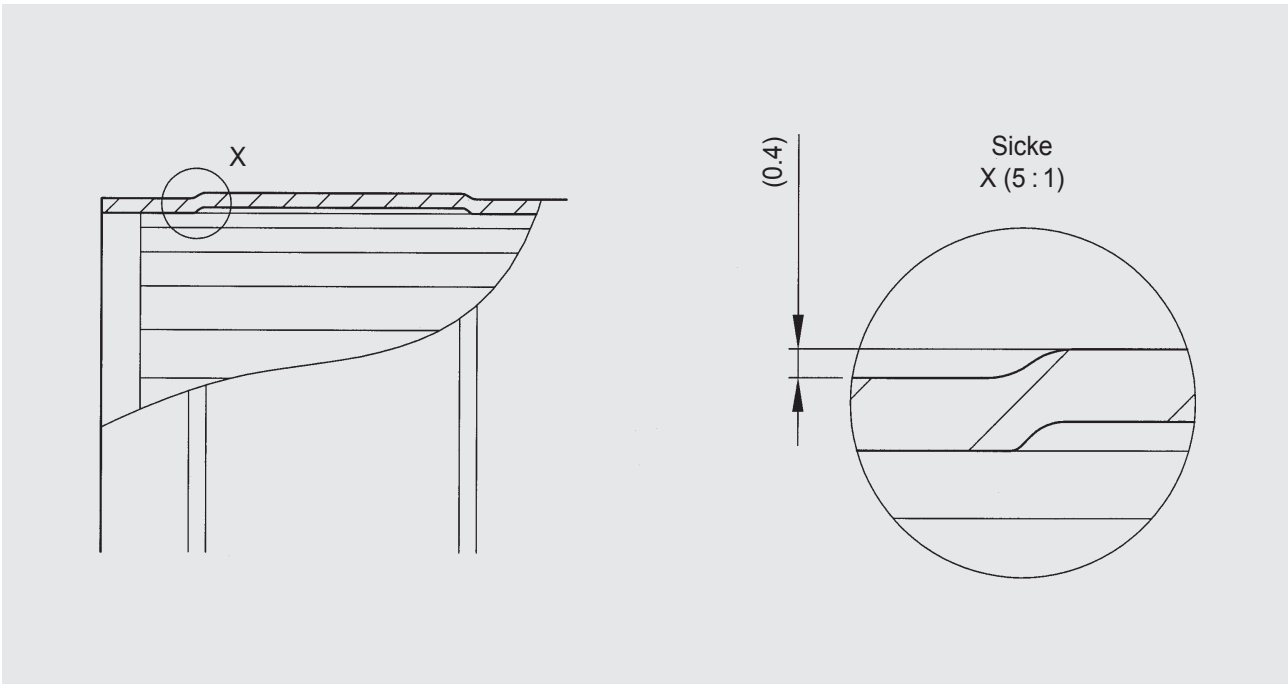


Abb. 12: Aufbau der integrierten Luftspaltisolation

2.1.2 Verringerung von Wärmeverlusten

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung des Wärmemanagements ist die Verwendung einer im Katmantel integrierten Luftspaltisolation.

Dazu wird kurz hinter dem Eintritt der Katalysatormatrix der Mantel so geformt, dass ein ringförmiger Luftspalt zwischen Mantel und Matrix entsteht.

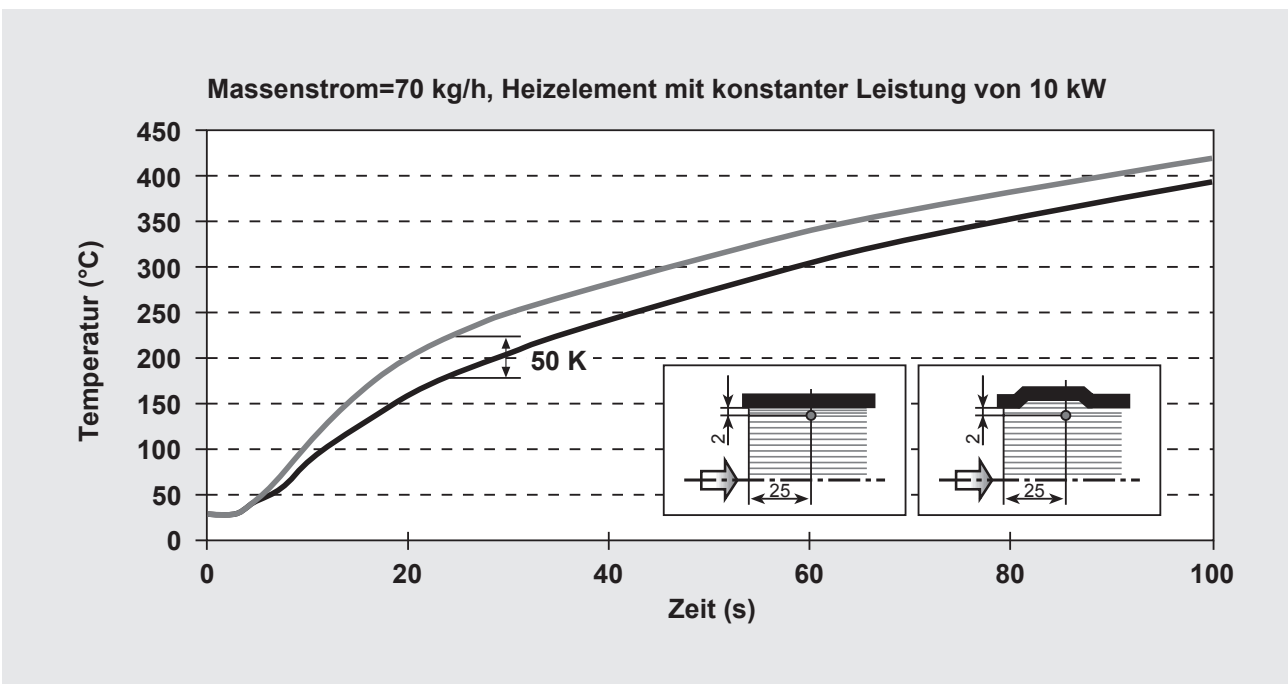


Abb. 13: Einfluss der integrierten Luftspaltisolation auf das Light Off Verhalten

Der Abstand zwischen Mantel und Matrix liegt bei nur 0,4 mm. Dies ist ausreichend, um eine Isolationswirkung zu erzeugen, die besonders beim Aufheizen des Katalysators Wärmeverluste über den Katalysatormantel minimiert [6].

Eine Temperaturmessung am Katalysatorrand (2 mm radial vom Mantel) belegt, dass bei gleicher Katalysatoreintrittstemperatur an der gemessenen Stelle bei der integrierten Mantelisolierung ein Temperaturvorteil von 50 K entsteht.

2.1.3 Emissionsergebnis der Katalysatoroptimierung

Durch die oben erwähnten Maßnahmen am Vorkatalysator konnten die Kaltstartemissionen deutlich verringert werden.

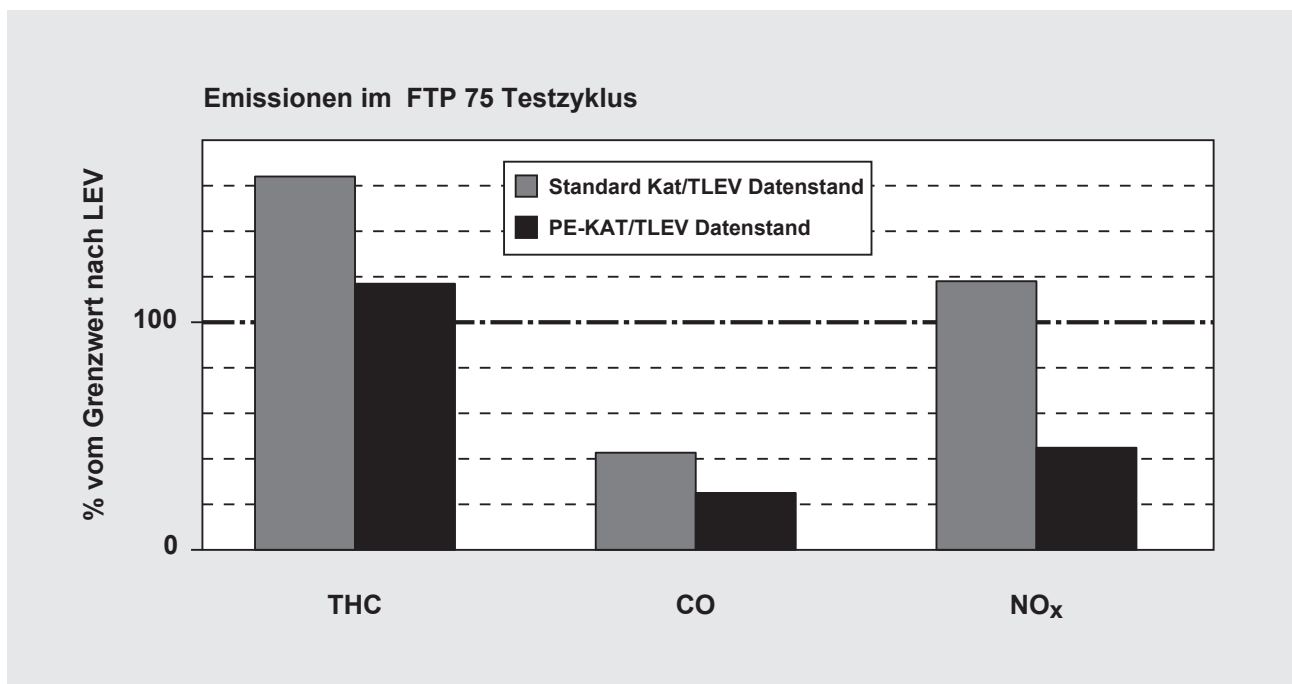


Abb. 14: Emissionsvergleich Standardkatalysator und PE-Katalysator mit TLEV-Motordatenstand

Im amerikanischen Fahrzyklus wurden die HC-Werte um etwa 30 % und die CO-Werte um etwa 40 % gesenkt.

Die NO_x-Werte konnten bei gleichem Katalysatorvolumen um 60 % reduziert werden. Erklärbar ist dies durch den Ausgleich der verbleibenden Einzelzylinder-Lambda-Werte im PE-Katalysator und einer gleichmäßigeren Strömungsverteilung. Dadurch wird die Qualität des Lambda-Signals verbessert.

2.2 Motorische Maßnahmen

Motorseitig sind alle Möglichkeiten zum Katalysatorheizen auszuschöpfen, wobei hier ein Optimum aus Heizwirkung und der damit verbundenen Rohemissionsveränderung gefunden werden sollte. Dabei muss in Verbindung mit der eingesetzten Kat-Technik ein Kompromiss gefunden werden.

Folgende Tabelle soll die möglichen Einzelstrategien und ihre Wirkung verdeutlichen:

Durch Einblasung von Sekundärluft in möglichst heißes Abgas wird in Kombination mit einem leicht fetten Motorbetrieb eine thermische Reaktion im Abgasstrang in Gang gesetzt.

Einzelstrategie	Ziel/Effekt	Grenze
Abmagerung im Start	Rohemissionsabsenkung	Aussetzer
Anfettung + Sekundärluft	Bereitstellung thermischer Energie zur Kataufheizung	HC-Durchbrüche
Zündwinkel spät im Warmlauf	Bereitstellung thermischer Energie zur Kataufheizung	Laufgrenze/Aussetzer
Drehzahlanhebung im Warmlauf	Bereitstellung thermischer Energie zur Kataufheizung	Fahrbarkeit Fahrzeug/ Abgasmassenstrom

Abb. 15: Strategien zur Rohemissionssenkung und Katalysatoraufheizung

Um eine möglichst hohe Abgastemperatur zu realisieren, wird der Motor bewusst mit einem schlechteren Wirkungsgrad betrieben. Hierzu wird der Zündwinkel bis an die Verbrennungsgrenze nach OT verschoben und somit der Luftdurchsatz erhöht.

Dieser Effekt wird durch eine geringfügige Anhebung der Leerlaufdrehzahl während der Katalysatorheizphase verstärkt.

Die motorischen Maßnahmen zielten in erster Linie auf die Verkürzung der Anspringzeit der Vorkatalysatoren lassen sich jedoch nicht isoliert betrachten, sondern sind nur in Verbindung mit der verringerten thermischen Masse der Vorkatalysatoren sinnvoll.

Die folgende Abbildung beschreibt die Temperaturen im Vorkat in den ersten 70 Sekunden des amerikanischen Fahrzyklus.

Gegenüber der TLEV-Abstimmung konnte durch die motorischen Maßnahmen und die reduzierte Wärmekapazität der PE-Katalysatoren bei der LEV-Applikation die Anspringtemperatur von etwa 300 °C 18 Sekunden früher erreicht werden.

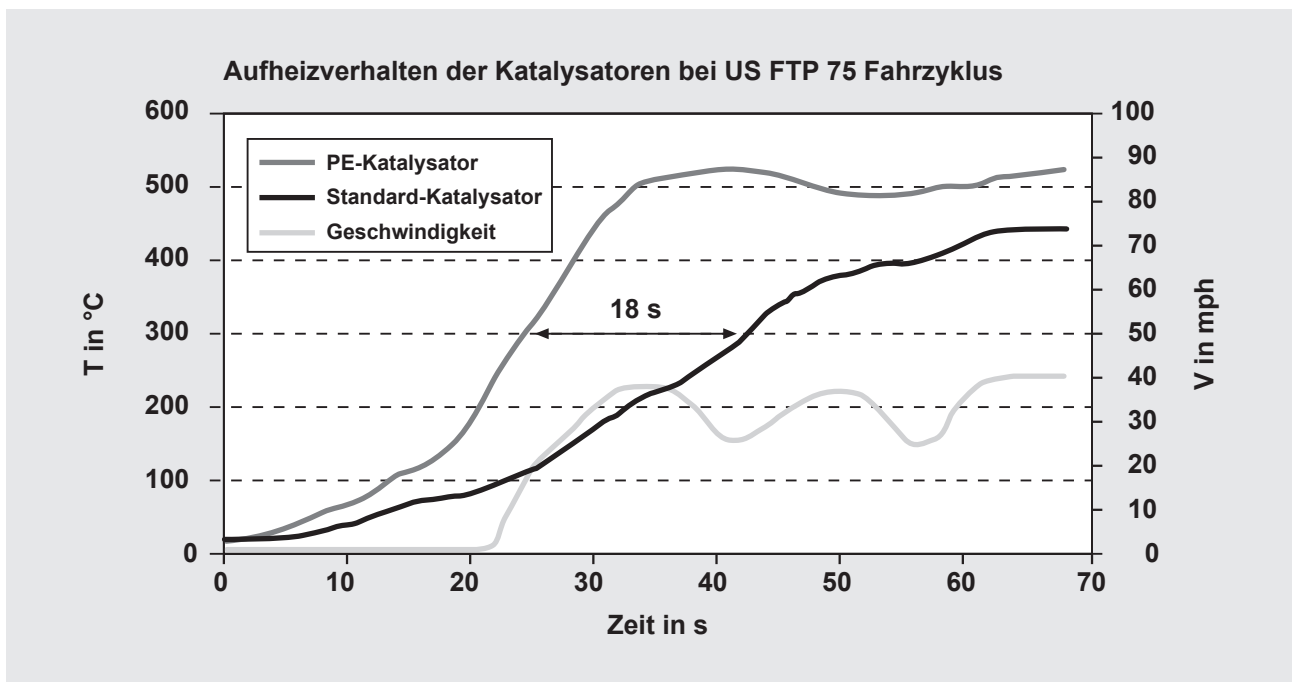


Abb. 16: Vergleich der Temperatur im Vorkatalysator im Kaltstart TLEV zu LEV

3. Gesamtergebnis

3.1 Emissionsergebnis

Abb. 17 zeigt die erzielte Emissionsreduzierung durch die PE-Technologie in Verbindung mit optimiertem Motormanagement. Alle drei emittierten Schadstoffe liegen in ausreichend sicherem Abstand zu den geforderten LEV-Werten.

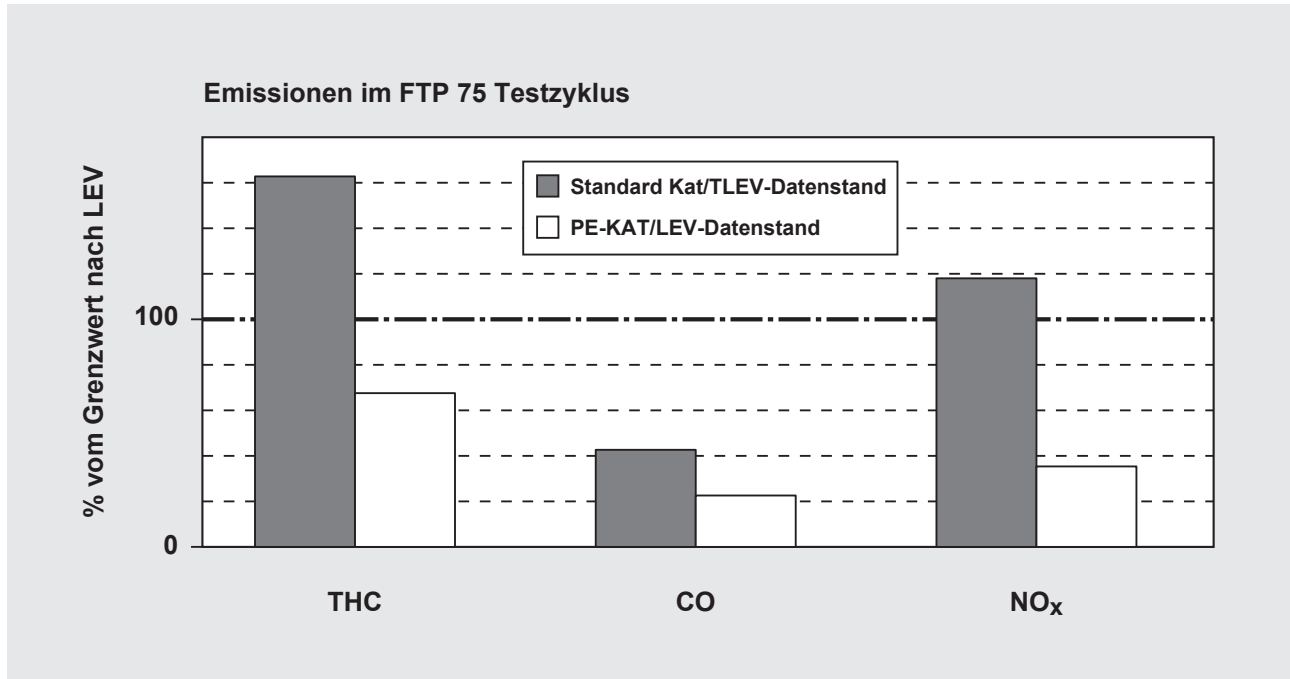


Abb. 17: Emissionsvergleich Standardkatalysator und PE-Katalysator mit TLEV- und LEV-Motordatenstand

3.2 Langzeitverhalten

Nach eigenen Richtlinien und gesetzlichen Anforderungen lässt sich aus Sicht der Abgassicherheit der Betrieb innerhalb der Grenzwerte gewährleisten.

Zur Überwachung der Emissionswerte wurden neben Abgasdauerläufen auch unter sportlichem Alltagsbetrieb genutzte Fahrzeuge mit einbezogen. Abbildung 18 zeigt Ergebnisse aus einem Abgasdauerlauf über 60.000 Meilen.

3.3 Dauerhaltbarkeit

Zum Nachweis der mechanischen und thermischen Haltbarkeit wurden die im Haus Audi üblichen Prüfstandstests absolviert, wobei insbesondere auch eine mögliche sehr sportliche Fahrweise bis hin zum Rennstreckenbetrieb berücksichtigt wurde. Eine endgültige Freigabe konnte nach erfolgreich absolvierten Straßenfahrprogramm erteilt werden. Hier wurde ebenfalls ein extrem sportlicher Fahrbetrieb mit einbezogen.

4. Ausblick

Mit der beschriebenen Entwicklung des RS6 konnte gezeigt werden, dass hohe Fahrzeugleistungen und strenge Abgasnormen nicht im Widerspruch zueinander stehen.

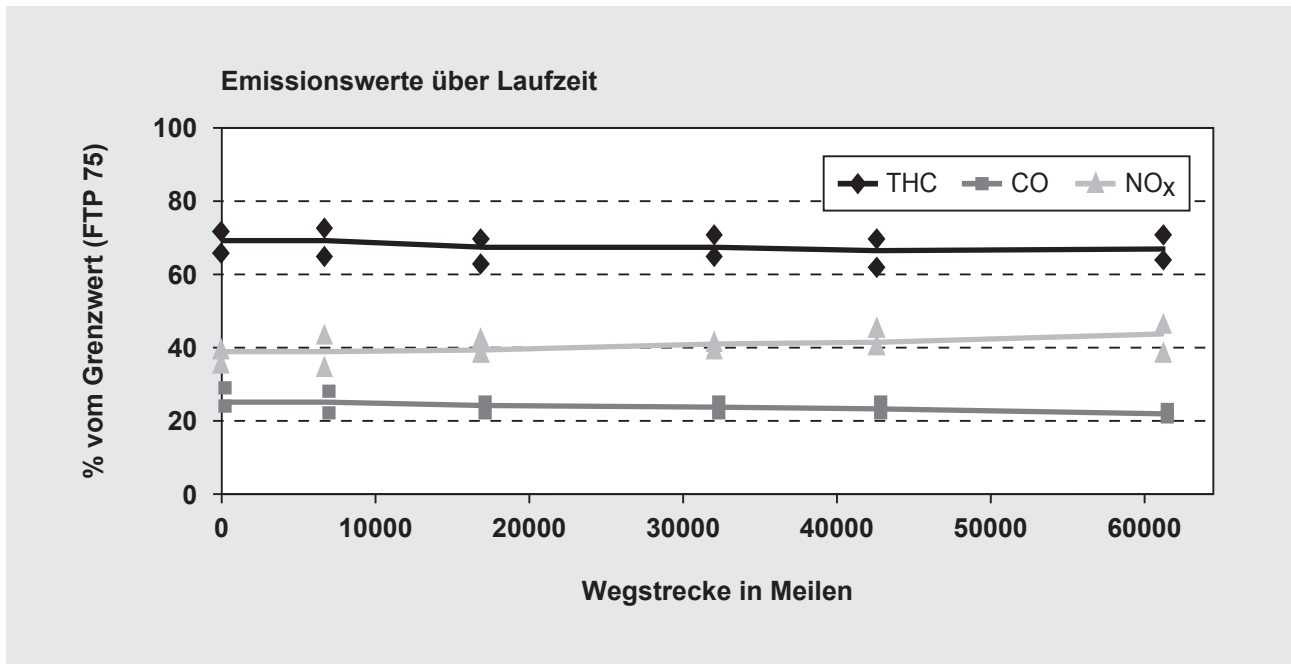


Abb. 18: Abgaswerte über Laufzeit bis 60.000 Meilen

Die vorgestellte Entwicklung wurde geprägt durch die kombinierte Anwendung von motorischen Maßnahmen mit einem innovativen Katalysatordesign. Hier ist der maßgebliche Einfluss des PE-Trägers hervorzuheben, mit dem die Zielsetzung der LEV-Zertifizierung erreicht werden konnte, ohne dass Leistungseinbußen hingenommen werden mussten. Die PE-Struktur zeigt bei hohen Zelldichten einen besonders hohen Queraustausch in den Kanälen. Dies lässt erwarten, dass bei einer Erhöhung der Zelldichte eine weitere katalytische Effektivitätssteigerung bei reduziertem Abgasgedruck möglich ist. Weitere Innovationen mit strukturierten Folien sind kurz vor Serienreife und werden dafür sorgen, dass auch zukünftig der Einklang zwischen hohen Fahrleistungen und strengen Abgasnormen erhalten bleibt.

5. Literaturverzeichnis

- [1] W. Maus, R. Brück, J. Diringer, Emitec GmbH. „Niedrigstmissions-Fahrzeuge sind heute realisierbar – Neue Innovations-schwerpunkte für metallische Katalysatorträger: Kostenreduzierung und Dauerhaltbarkeit“, Symposium Esslingen 2002
- [2] M. Ganz, quattro GmbH. „Der Audi RS6-Motor ein weiteres Highlight der Turbomotorentechnik“, 11. Aachener Kolloquium, 2002
- [3] G. Faltermeier, B. Pfalzgraf, Audi AG. A. Donnerstag, Volkswagen AG. W. Maus, R. Brück, C. Kruse; Emitec GmbH. „Katalysatorkonzepte für zukünftige Abgasgesetzgebungen am Beispiel eines 1,8 l 5V-Motors“, 17. Internationales Wiener Motorensymposium, 1996
- [4] P. Marsh, F. Acke, Volvo/ R. Konieczny, R. Brück, P. Hirth, Emitec GmbH. „Application Guideline to define a Catalyst Layout for maximum Catalytic Efficiency“, SAE – Paper # 2001-01-0929
- [5] S. Hosogai, Honda. K. Komatsu, Y. Unno, Emitec GmbH. „The Hybrid Catalyst, a New Catalyst Concept to Improve Utilization of Exhaust Gas Energy and Increase the Efficiency of Diesel Catalyst Systems“, 24. Internationales Wiener Motorensymposium, 2003
- [6] H-D. Erdmann, J. Königstedt, M. Fitzen, Audi AG. „Erster ULEV-Ottomotor – der Audi 1,8-l-Fünfventil-Turbo mit 125 kW“, MTZ 62 (2001) 2
- [7] R. Brück, R. Diewald, P. Hirth, F.-W. Kaiser, Emitec GmbH. „Design Criteria for Metallic Substrates for Catalytic Converters“, SAE-Paper 950789
- [8] H. Weltens, H. Bressler, P. Krause.: „Influence of Catalytic Converters on Acoustics of Exhaust Systems for European Cars“, SAE-Paper 910836, 1996
- [9] M. Bollig, J. Liebl, R. Zimmer et al, „Next Generation Catalysts are turbulent: Development of Support and Coating“, SAE-Paper 2004-01-1488